



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Centro Demostrativo y de
Transferencia Tecnológica de
Gasificación de Biomasa

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico Electricista
Área Eléctrica y Electrónica

P R E S E N T A

Daniel Camarena Elizondo

ASESOR DE INFORME

Dr. Luis Agustín Álvarez Icaza Longoria



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

Informe de actividades profesionales como opción de titulación.

Ingeniero Mecánico Electricista, Facultad de Ingeniería, UNAM.

“Centro Demostrativo y de Transferencia Tecnológica de Gasificación de Biomasa”

Daniel Camarena Elizondo



Centro Demostrativo y de Transferencia Tecnológica de Gasificación de Biomasa. Planta de Composta, Ciudad Universitaria, UNAM

Tabla de contenido

1	Introducción y objetivo.....	1
2	Descripción de la empresa.....	1
3	Marco teórico	2
3.1	Estado del Arte	2
4	Antecedentes del proyecto.....	4
4.1	Contexto nacional del aprovechamiento energético.....	4
4.2	Principales limitantes	6
4.3	Potencial carbono negativo.....	7
5	Definición del problema	8
6	Metodología utilizada	9
6.1	Propuesta de sistemas	9
6.2	Construcción y montaje	11
6.3	Pruebas de viabilidad.....	12
6.3.1	Selección de biomasas residuales	12
6.3.2	Determinación de la factibilidad técnica y el potencial energético.....	12
6.3.3	Viabilidad económica	16
6.4	Divulgación y transferencia de conocimiento	18
7	Participación Profesional	22
8	Resultados y aportaciones	22
9	Conclusión	25
10	Bibliografía	25
11	Glosario.....	30
12	Anexos	30

Fotografías

Fotografía 1: Montaña de aserrín, aserradero comunitario, Ejido Yoquivo, Municipio de Bato Pilas, Chihuahua. Fuente: G2E.....	6
Fotografía 2: Proceso de ensamble de Piro-gasificador. Fuente G2E.....	11
Fotografía 3: Montaje de ciclón del secante. Fuente: G2E.....	11
Fotografía 4: Comparativo de avance de construcción. Fuente: G2E.....	12
Fotografía 5: Medición de contenido de humedad mediante balanza termogravimétrica. Fuente: G2E.....	13
Fotografía 6: Residuos de invernadero, planta de tomate, secado solar. Fuente: G2E.....	13
Fotografía 7: Pulpa seca de cereza de café para ser densificada. Fuente: G2E.....	14
Fotografía 8: Briqueta de pulpa de café. Fuente: G2E.....	14
Fotografía 9: Almacenaje de briquetas de pulpa de café. Fuente: G2E.....	14
Fotografía 10: Costales pre-pesados de olote de maíz. Fuente: G2E.....	14
Fotografía 11: Vista interior de proceso de piro-gasificación de olote de maíz. Fuente: G2E.....	14
Fotografía 12: Olote de maíz y biocarbón de olote de maíz después de piro gasificación. Fuente: G2E.....	14
Fotografía 13: Analizador de gas de síntesis con sistema de limpieza de seguridad. Fuente: G2E.....	15
Fotografía 14: Pantalla de muestro de gas de síntesis. Fuente: G2E.....	15
Fotografía 15: Visita alumnos cuarto de primaria del Liceo Franco Mexicano. Fuente: G2E.....	19
Fotografía 16: Visita Enrique Graue, Rector UNAM y William Lee, Coordinador de la Investigación Científica, UNAM. Fuente: Gaceta UNAM.....	19
Fotografía 17: Visita César Hernández, Subsecretario Electricidad SENER, Rodolfo Lacy, Subsecretario Planeación SEMARNAT. Fuente: G2E.....	19
Fotografía 18: Visita Leonardo Beltrán, Subsecretario de Planeación SENER. Fuente: Twitter @LeoBeltranR.....	19
Fotografía 19: Enrique Ochoa, Director General CFE. Fuente: Twitter @EnriqueOchoaR.....	20
Fotografía 20: El Economista. Fuente: Vargas Parada 2015.....	21
Fotografía 21: El Economista. Fuente: Vargas Parada 2016 a.....	21
Fotografía 22: El Economista. Fuente: Vargas Parada 2016 b.....	21
Fotografía 23: Visita Enrique Graue, Rector UNAM y William Lee, Coordinador de la Investigación Científica, UNAM. Fuente: Gaceta UNAM.....	21

Ilustraciones

Ilustración 1: Diagrama ORC (Organic Rankine Cycle). Fuente: G2E.....	2
Ilustración 2: Gasificador “Imbert”. Fuente: G2E.....	3
Ilustración 3: Proceso de gasificación y aprovechamiento energético. Fuente: G2E.....	3
Ilustración 4: Ciclo de biocarbón. Fuente: G2E.....	8
Ilustración 5: Modelo de pruebas de sistemas de gasificación. Fuente G2E.....	10
Ilustración 6: Render “Centro Demostrativo y de Transferencia Tecnológica de Gasificación de Biomasa”. Fuente: G2E.....	10
Ilustración 7: Gasificación, limpieza y moto-generador de combustión interna. Fuente: G2E.....	23
Ilustración 8: Gasificación y moto-generadores de combustión externa. Fuente: G2E.....	24
Ilustración 9: Alimentación directa a moto-generadores de combustión externa. Fuente: G2E.....	24
Ilustración 10: Planta móvil de moto-generadores de combustión externa. Fuente: G2E.....	24

Tablas

Tabla 1: Comparativo de tecnologías para aprovechamiento de biomasa. Fuente: G2E.....	4
Tabla 2: Selección original de equipos de gasificación. Fuente: G2E.....	9
Tabla 3: Mediciones de corridas de olote de maíz en gasificador Combo-40. Fuente: G2E.....	16
Tabla 4: Comparativo económico de resultados de los distintos gasificadores probados con olote de maíz. Fuente: G2E.....	17
Tabla 5: Simulación financiera de distintos escenarios de un proyecto de gasificación de olote de maíz. Fuente: G2E.....	18

1 Introducción y objetivo

El presente reporte lo presento como informe del trabajo realizado para la creación de la idea original, obtención de recursos financieros, construcción y operación del “Centro Demostrativo y de Transferencia Tecnológica de Gasificación de Biomasa”.

La finalidad del centro demostrativo es que sirva como catalizador en México para fomentar el aprovechamiento energético de residuos agroforestales.

2 Descripción de la empresa

G2E, S.A.P.I. de C.V. se dedica a realizar proyectos de energía renovable a partir de biomasa. La empresa fue fundada junto con otros dos socios como continuidad del trabajo realizado en la asociación civil Gente como Nosotros A.C., en la cual también fui socio fundador y director general. La ejecución de proyectos productivos en zonas rurales de México permitió identificar la necesidad de aprovechar el potencial de generación energética de la biomasa con la finalidad de atender las demandas del mercado energético y los requerimientos de diversificación de la matriz energética, este no es una necesidad exclusiva de nuestro país sino de todo el planeta, en particular de los países menos industrializados.

G2E fue fundada el 18 de julio de 2013, fecha desde la cual me desempeño como director general, siendo mi responsabilidad son todas las áreas de la empresa; sin embargo, por ser una micro empresa, mis actividades abarcan desde los aspectos operativos y hasta los estratégicos de corto, mediano y largo plazo.

Hoy en día, como consecuencia de las condiciones desfavorables prevalentes en el contexto nacional, derivadas de un mercado eléctrico distorsionado y la falta de claridad normativa e institucional generadas por la reciente, y aún en ejecución, Reforma Energética, G2E se encuentra buscando otros mercados cuyas características permitan la ejecución de proyectos rentables. Actualmente, se están iniciando operaciones en Nueva Zelanda e Indonesia, considerando proyectos adicionales en otras naciones insulares del Pacífico Sur. La apertura de estos nuevos mercados, con sus distintas aristas contables, técnicas, legales y comerciales, entre otras, es mi responsabilidad.

3 Marco teórico

3.1 Estado del Arte

En lo que respecta al Proyecto del Centro Demostrativo, participé activamente en la generación de la idea conceptual apoyado en un análisis de estado de arte de diferentes tecnologías de generación eléctrica, el cual resumo a continuación.

Realicé una comparación de distintas tecnologías, entre ellas las turbinas de vapor de ciclos orgánicos Rankine (ORC) y los sistemas de gasificación. Los sistemas con mayor difusión son los ORC pero, dentro del rango de potencia necesario para el proyecto (entre 50 y 100 kW_e), la eficiencia de estos procesos es hasta un 50% menor que la de los sistemas de gasificación y representan una mayor inversión, pudiendo incluso doblar en costo a los sistemas de gasificación con aire ambiente que fueron seleccionados. Adicionalmente, la oferta de los sistemas ORC es muy limitada dentro del rango de potencia necesario.

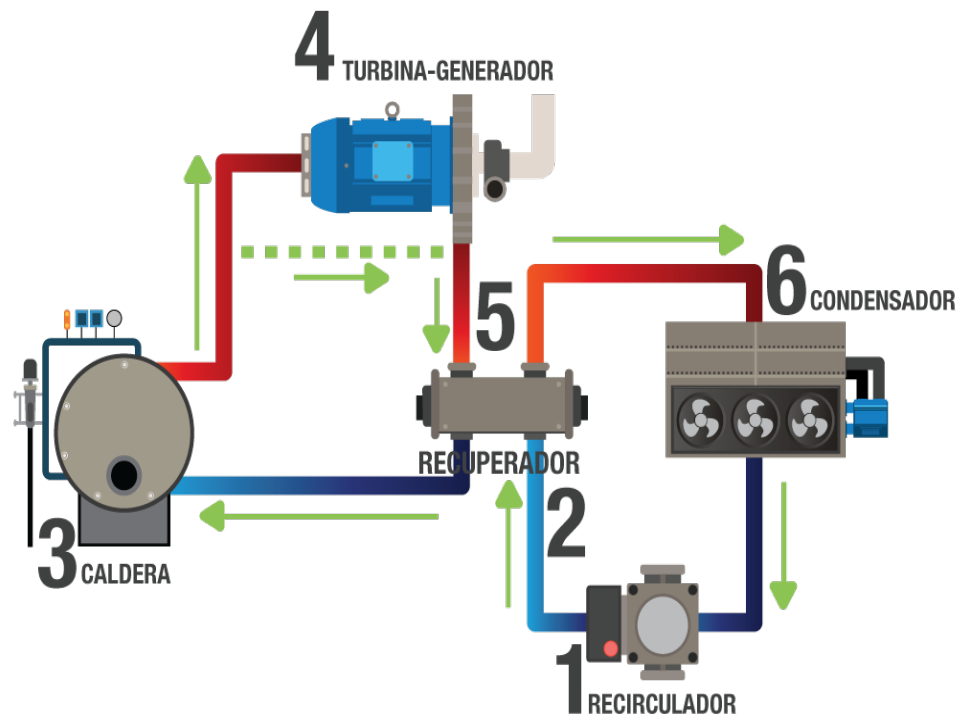


Ilustración 1: Diagrama ORC (Organic Rankine Cycle). Fuente: G2E.

La tecnología con mayor impulso en la actualidad es la gasificación dada su eficiencia y versatilidad. Esto no significa que sea una tecnología nueva, sus primeros usos industriales datan del 1813 cuando el alumbrado público de la ciudad de Westminster, Inglaterra, se realizaba a partir de lámparas alimentadas por gas de coque producido mediante gasificación.

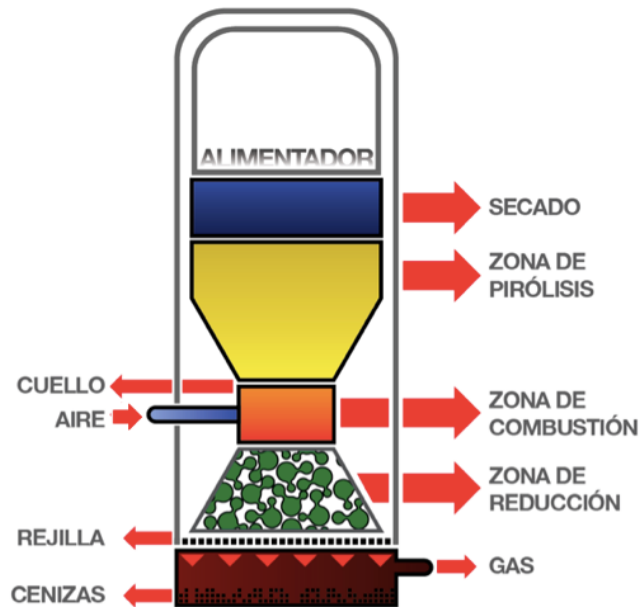


Ilustración 2: Gasificador "Imbert". Fuente: G2E.

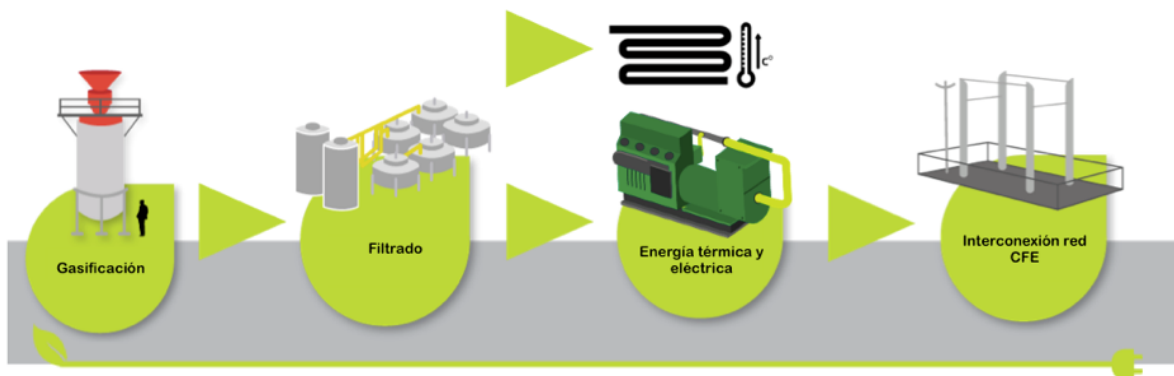


Ilustración 3: Proceso de gasificación y aprovechamiento energético. Fuente: G2E.

La posibilidad de alimentar el gas de síntesis generado a un motor Diesel (Cummins, Deutz, entre otros) con modificaciones menores es uno de los elementos que brindan una gran versatilidad a los sistemas de gasificación para la generación eléctrica. Dentro de las comunidades rurales en México hay personal familiarizado con esta tecnología, no siendo así con las turbinas de vapor o de gas.

La siguiente tabla muestra un comparativo de tecnologías consideradas, sus eficiencias y sus costos.

Tabla 1: Comparativo de tecnologías para aprovechamiento de biomasa. Fuente: G2E.

Comparativo de tecnologías							
Marca	Tipo	Capacidad kWe	Eficiencia	kg / kWe	Precio usd ¹	Factor de Planta	\$usd / kWe ²
Aqylon	ORC ³	700	22%	1.6	\$2,979,750	0.9	\$4,730
Infinity	ORC	250	9%	3.5	\$900,000	0.9	\$4,000
Maxxtec	ORC	600	14%	2.8	\$5,573,160	0.9	\$10,321
Turboden	ORC	280	18%	2.2	\$1,846,760	0.9	\$7,328
Verdicorp	ORC	200	11%	3.2	\$1,337,682	0.9	\$7,432
Biodigestión ⁴		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G2E	Gasificación	354	30%	1.1	\$1,056,129	0.8	\$3,729
Ligento	Gasificación	140	30%	1.1	\$905,000	0.8	\$8,080
Green Energy Solution	Gasificación	200	30%	1.1	\$2,328,060	0.8	\$14,550
Powermax	Gasificación	100	26%	1.2	\$142,000	0.8	\$1,775
Powermax	Gasificación	1,000	26%	1.2	\$817,000	0.8	\$1,021
Shangqiu ⁵	Gasificación	375	33%	1	\$984,125	1	\$2,624

¹ El precio esta considerado solo el valor del equipo en su lugar de origen

² Considerando escalar todos los equipos a un 100% de factor de planta para una comparación equitativa

³ ORC Organic Rankine Cycle (Ciclo Orgánico Rankine). Estos no incluyen costos de caldera.

⁴ No viable para madera por su alto contenido celulósico

⁵ Hay muchas inconsistencias en la información lo que hace dudar se su veracidad. Garantía de 2 meses en motores.

A pesar de que la literatura referente a la gasificación de biomasa es extensa, la mayoría de los trabajos se han desarrollado utilizando un solo tipo de gasificador alimentado con un máximo de cuatro biomasa distintas; por ello, es poco viable realizar una comparación bajo parámetros similares que permita evaluar el desempeño de distintos gasificadores utilizando distintas biomasa. Adicionalmente, la literatura se enfoca principalmente a equipos de escala laboratorio en una etapa muy temprana de desarrollo, o bien, a equipos de una alta complejidad empleando agentes oxidantes de alto costo asociado como vapor de agua o aire enriquecido, los cuales resultan inapropiados para el contexto nacional.

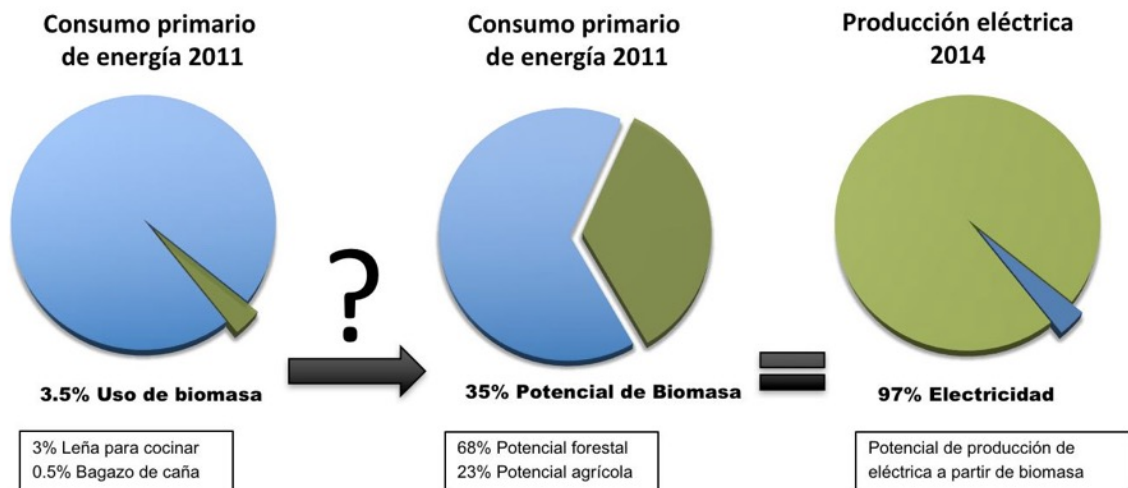
4 Antecedentes del proyecto

4.1 Contexto nacional del aprovechamiento energético

México tiene una producción anual de alrededor de 279 millones de toneladas de biomasa residual. Dentro de los residuos, se encuentran distintos tipos de biomasa aprovechable para generación energética: agrícola, forestal, fracción orgánica de los residuos urbanos, entre otros. Dichos residuos aprovechables equivalen a aproximadamente 3.5 millones de terajoules (3,500 petajoules). Del potencial total 68% viene de los bosques y el 23% de campos agrícolas. (Atlas de Biomasa CFE-SENER, 2014)

“Sin embargo, solo se aprovechan 348 PJ (258 PJ de leña y 90 de bagazo de caña) es decir solo el 10% del potencial de biomasa”. (Balance Nacional de Energía 2011, SENER)

“El total de consumo energético del país en el 2011 fue de 9,190 PJ, la biomasa podría cubrir el 35% de las necesidades energéticas de México”. (Balance Nacional de Energía 2011, SENER)



Source: National Energy Balance 2011, SENER.
Source: Biomass Atlas, CFE-SENER.

Gráfica 1: Potencial Energético de Biomasa. Fuente: G2E.

Hasta hace pocos años, el aprovechamiento energético de biomasa ha sido más un beneficio secundario de menor importancia asociado a la necesidad de dar salida a la gran generación de residuos orgánicos que un objetivo en sí mismo; a raíz de ello, cuando se ha llevado a cabo, ha sido con una baja eficiencia. El método tradicional de aprovechamiento energético de biomasa es a través de calderas de vapor y turbinas; según estudios realizados por G2E, estos sistemas tienen una eficiencia del 7% hasta el 25% para equipos que van en rangos del 100 kW_e a 15 MW_e.

Un buen ejemplo del aprovechamiento marginal de la biomasa residual es la industria de aserrío, que establece sus aserraderos junto a cañadas para poder disponer del aserrín producido, acumulándolo durante años y llegando a formar montañas de decenas de metros de alto (Fotografía 1). De igual manera las costeras son tiradas y quemadas a cielo abierto durante todo el año (humareda apreciable en la Fotografía 1) para evitar su acumulación.



Fotografía 1: Montaña de aserrín, aserradero comunitario, Ejido Yoquivo, Municipio de Bato Pilas, Chihuahua. Fuente: G2E.

Otro ejemplo son las industrias tequilera y mezcalera que desperdician el 100% del bagazo generado en sus procesos de beneficio del agave. Incluso Blue Fuel, S.A.P.I. de C.V., quienes toman los residuos restantes tras la destilación para su proceso de producción de etanol de segunda generación, tienen como residuo de su proceso biomasa.

4.2 Principales limitantes

Existen distintas limitantes para el aprovechamiento energético de la biomasa. La principal son las políticas de subsidios que distorsionan el mercado de los energéticos, lo que conlleva un problema de falta de competitividad económica ante los energéticos convencionales, principalmente la electricidad. El mercado monopolístico controlado por el estado (PEMEX y CFE) limita la inclusión de fuentes alternativas de energía.

Dentro de este mercado distorsionado se encuentra la electrificación rural. El costo que CFE debe cubrir para entregar 1 kWh en una zona rural es de entre \$5.00 y \$8.00; sin embargo, el precio de venta que paga el consumidor es de \$1.30 o menos, en el caso de las tarifas domésticas. Para ser rentable, la electricidad generada a partir de biomasa se debe vender a \$3.50 kWh. Al comparar los dichos costos, resulta evidente que, en primera instancia, sería mucho más rentable para CFE comprar a \$3.50 el kWh producido en sitio en una zona rural mediante el aprovechamiento de biomasa residual que producirlo y transportarlo con un costo de \$5.00,

considerando un escenario optimista. Sin embargo, las políticas de CFE no le permiten hacer esta simple transacción.

Finalmente, otro reto es la falta de cuantificación económica de los impactos negativos y/o positivos asociados a la generación eléctrica, que emplea energéticos convencionales como los combustibles fósiles y aquella que utiliza fuentes limpias y/o renovables. En el caso especial de la energía de biomasa, ésta es la única que tiene el potencial no solo de ser carbono neutral sino incluso carbono negativo mediante el aprovechamiento del biocarbón, generado durante el proceso de gasificación, como mejorador de suelos.

4.3 Potencial carbono negativo

El biocarbón es carbón vegetal generado dentro del gasificador durante la pirólisis que se lleva a cabo como parte del proceso de gasificación. Dentro de los posibles usos del biocarbón, el principal es como mejorador o remediador de suelos. Derivado de sus características físico-químicas, el biocarbón es altamente resistente a la degradación química y biológica, permitiéndole permanecer estable en el suelo por cientos de años, como es el caso de zonas altamente fértiles en el Amazonas con suelos llamados “Terra Preta de Indio” (Lehmann et al., 2006)

En el siguiente diagrama se muestra el ciclo del biocarbón, el cual comienza cuando las plantas asimilan el CO₂ atmosférico durante su crecimiento. Posteriormente, los residuos agroforestales derivados de las actividades productivas son aprovechados para producir energía y son transformados en biocarbón. El biocarbón, al ser utilizado para mejorar o restaurar suelos agrícolas, permite realizar un secuestro del carbono que fue inicialmente retirado de la atmósfera por las plantas durante su desarrollo. Finalmente, dicha adición de biocarbón a los suelos propicia un mayor desarrollo vegetal, proveyendo un incremento en los beneficios económicos derivados de las actividades agrícolas.

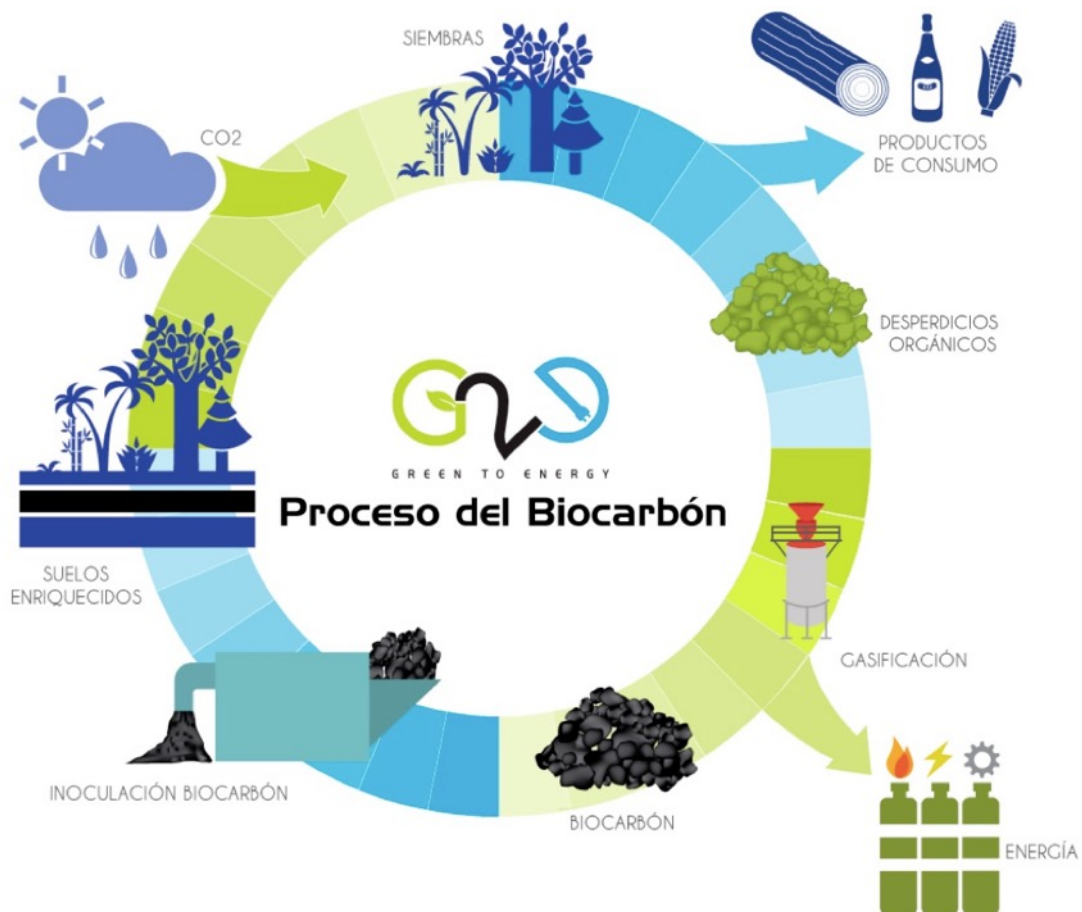


Ilustración 4: Ciclo de biocarbón. Fuente: G2E.

5 Definición del problema

La falta de conocimiento y experiencias prácticas en el país son una limitante para el aprovechamiento energético de residuos de biomasa y la promoción tanto de políticas públicas como de mecanismos de financiamiento que faciliten la implementación exitosa de proyectos, tanto desde la parte tecnológica como de su rentabilidad financiera.

En el caso particular del centro demostrativo no se buscaba desarrollar tecnología desde cero sino obtener experiencia a partir de tecnología comercialmente madura y, con base en ella, poder desarrollar lo que fuera necesario para “tropicalizar” la solución al contexto mexicano.

El caso específico de México es singular a nivel mundial por la alta distorsión del mercado eléctrico causada por los subsidios en las tarifas eléctricas. La red de distribución eléctrica permite que casi el 99% de los mexicanos tengan acceso a este servicio, generando retos y oportunidades al mismo tiempo.

La biomasa se encuentra distribuida por todo el país y con ella los posibles residuos disponibles. La baja densidad energética de la biomasa encarece el costo de logística y transporte para llevarla a grandes plantas de 50 MW_e o más. De aquí la importancia de contar con una solución tecnológica que permita un aprovechamiento energético local (distribuir la tecnología) y aprovechar la red de distribución eléctrica que permite subir hasta 8 MW_e en cualquier punto de la misma.

6 Metodología utilizada

6.1 Propuesta de sistemas

La implementación del centro demostrativo inició con la selección de los equipos a instalar.

Para el proyecto, propuse la utilización de gasificadores que tuvieran rastreabilidad de presencia en el mercado o que estuvieran respaldados por instituciones académicas de reconocimiento internacional. La propuesta original se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2: Selección original de equipos de gasificación. Fuente: G2E.

Modelo	PG40	COMBO 40	GEK 20	VIKING
Fabricante	Ankur Scientific	Ankur Scientific	All Power Labs	Denmark Technology University
País de Origen	India	India	Estados Unidos	Dinamarca
P. Intelectual	protegido	protegido	open source	protegido
Capacidad Kg/h	40	40	25	40
Capacidad kWe	38	38	20	38
Rango Capacidades	30 kWe - 900 kWe	10 kWe - 2,200 kWe	10 kWe - 20 kWe	40kWe - 1000 kWe
% humedad	35%	20%	30%	35%
% biocarbon	25%	5%	3%	25%
Sistema Filtrado	Humedo/Seco	Humedo/Seco	Seco	Seco
Temperatura	800	1100	800	600 - 1100
Nicho Mercado	Rural	Industrial	Universidades	Combinado
Equipos instalados	> 400	>1200	>400	>15

Por cuestiones de presupuesto, fue necesario cambiar el gasificador de doble etapa de la Universidad Tecnológica de Dinamarca por otro de tipo Imbert de la empresa China Powermax. Este cambio tuvo resultados desfavorables ya que, a la fecha, la empresa no ha cumplido con el

contrato de venta que incluye la instalación del equipo y el equipo se recibió con daños en diversos componentes y piezas faltantes.

Dado que el proyecto buscaba encontrar la mejor combinación “acondicionamiento-gasificador-sistema de limpieza” para cada proyecto en específico diseñé el siguiente esquema para ser implementado en el proyecto.

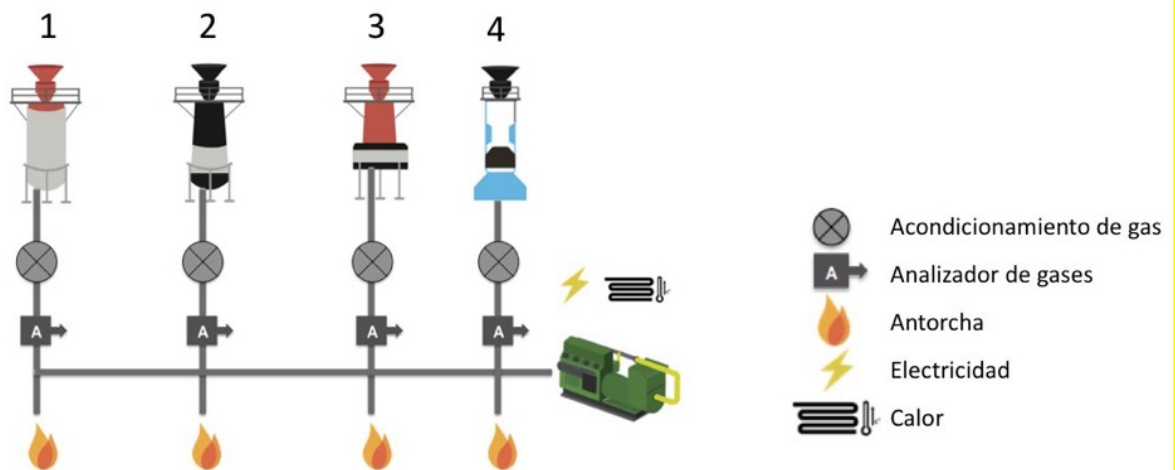


Ilustración 5: Modelo de pruebas de sistemas de gasificación. Fuente G2E.

Una vez seleccionados los equipos, se realizó el desplante digital de los equipos y la infraestructura, llevando una lógica por secuencia de operaciones y alturas libres del techo, donde por ejemplo se intercambié la posición del secante con la densificadora.



Ilustración 6: Render “Centro Demostrativo y de Transferencia Tecnológica de Gasificación de Biomasa”. Fuente: G2E.

6.2 Construcción y montaje

La construcción y puesta en marcha de los equipos fue realizada por nosotros con apoyo de un técnico supervisor de parte del fabricante de los equipos.

El montaje de los equipos (Fotografía 2 y Fotografía 3) permitió fortalecer la capacidad técnica de G2E en cuanto al diseño y ejecución de proyectos de aprovechamiento energético mediante gasificación. Dicho enfoque “hands-on” ha sido una filosofía que hemos procurado contemplar en todas las actividades de G2E con la finalidad de que el personal tenga un profundo conocimiento de los diversos aspectos que componen las actividades de la empresa.

Como se aprecia en la Fotografía 4, el proceso de construcción y montaje fue rápido y se llevó a cabo sin contratiempos.



Fotografía 2: Proceso de ensamble de Piro-gasificador. Fuente G2E.



Fotografía 3: Montaje de ciclón del secante. Fuente: G2E.



Fotografía 4: Comparativo de avance de construcción. Fuente: G2E.

6.3 Pruebas de viabilidad

6.3.1 Selección de biomasas residuales

En conjunto con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) se seleccionaron 10 biomasas para realizar las pruebas de factibilidad técnica y financiera. Las biomasas seleccionadas fueron: olote de maíz, pulpa de café, pasta de higuera, paja de trigo, residuos de invernadero (jitomate), gallinaza, bagazo de agave, cachaza de caña de azúcar, poda de *Jatropha* y huesillo de coco.

6.3.2 Determinación de la factibilidad técnica y el potencial energético

Previo a la recepción de las diversas biomasas en el centro demostrativo, se enviaron muestras para su caracterización al Centro de Investigación Regional Golfo Centro del INIFAP, Campus San Martinito. Las pruebas realizadas fueron poder calorífico bruto y análisis proximal.

A la recepción de las diferentes biomasas en el centro demostrativo, se determinó el contenido de humedad mediante termogravimetría con la finalidad de determinar si este se encontraba por debajo del máximo de 20% permisible en los equipos (Fotografía 5). Aquellas

biomasas cuyo contenido de humedad excedió el 20% hubieron de ser secadas, para lo cual el método preferido fue el secado pasivo al sol hasta alcanzar un contenido de humedad por debajo de 20% (Fotografía 6)



Fotografía 5: Medición de contenido de humedad mediante balanza termogravimétrica. Fuente: G2E.



Fotografía 6: Residuos de invernadero, planta de tomate, secado solar. Fuente: G2E.

Algunas biomasas, como el olote o el huesillo de coco, fue posible introducirlas a los gasificadores sin necesidad de acondicionamiento; sin embargo, la gran mayoría tiene que ser acondicionada mediante los procesos de secado, triturado y densificado, según sus características físicas, de lo contrario pueden ocasionar una operación irregular dentro del gasificador, ya sea generando huecos o ahogando la reacción al no permitir el flujo de aire entre la biomasa, o al no alcanzar a encender por su alto contenido de humedad.

El proceso de densificado se realiza a distintos contenidos de humedad dependiendo de la biomasa y éstos van desde 12% hasta el 20%. Las distintas posibilidades fueron exploradas con aquellas biomasas que lo requirieron como el bagazo de agave, el tamo de olote, el residuo de invernadero y la pulpa de café (Fotografía 7 y Fotografía 8). Las briquetas, de gran longitud, fueron almacenadas para su posterior dimensionamiento manual (Fotografía 9).



Fotografía 7: Pulpa seca de cereza de café para ser densificada. Fuente: G2E.



Fotografía 8: Briqueta de pulpa de café. Fuente: G2E.



Fotografía 9: Almacenaje de briquetas de pulpa de café. Fuente: G2E.

Una vez acondicionada la biomasa, se pesó en sacos (Fotografía 10) y se cuantificó horariamente su alimentación en los reactores (Fotografía 11), de igual forma se cuantificó y documentó la salida de carbón (biocarbón, Fotografía 12) y cenizas. El flujo de gas y su poder calorífico contrastado con la biomasa entrante nos permite saber el balance energético del proceso.



Fotografía 10: Costales pre-pesados de olote de maíz. Fuente: G2E.

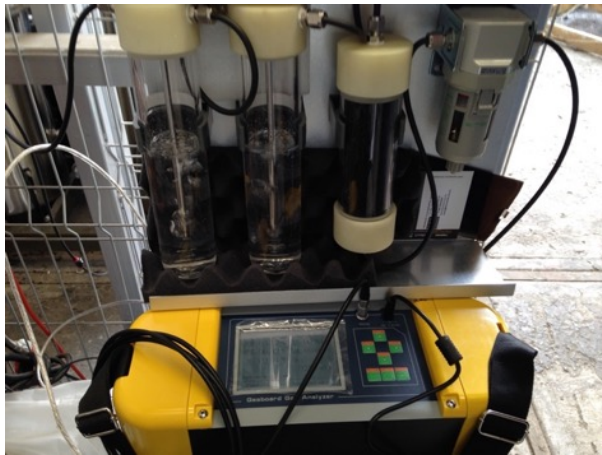


Fotografía 11: Vista interior de proceso de piro-gasificación de olote de maíz. Fuente: G2E.

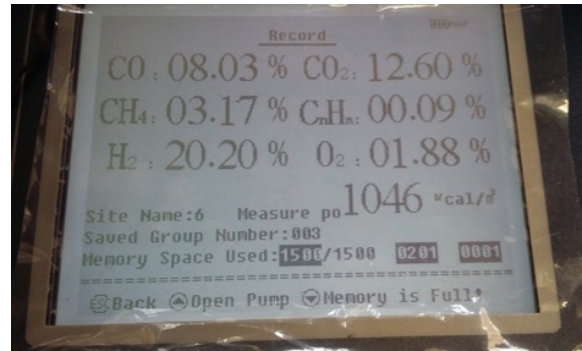


Fotografía 12: Olote de maíz y biocarbón de olote de maíz después de piro gasificación. Fuente: G2E.

Con base en el poder calorífico bruto determinado en la caracterización inicial de las biomásas, se realizó una corrección por contenido de humedad para conocer el poder calorífico neto de la biomasa alimentada al equipo y, de esta manera, la energía total que ingresó por hora. Mediante un analizador portátil de gas de síntesis (Fotografía 13 y Fotografía 14), se analizó la composición del gas producido y su poder calorífico (Gráfica 2) y, con un vénturi en la conducción de gas y una curva de calibración provista por el fabricante, se cuantificó el flujo horario de gas.



Fotografía 13: Analizador de gas de síntesis con sistema de limpieza de seguridad. Fuente: G2E.

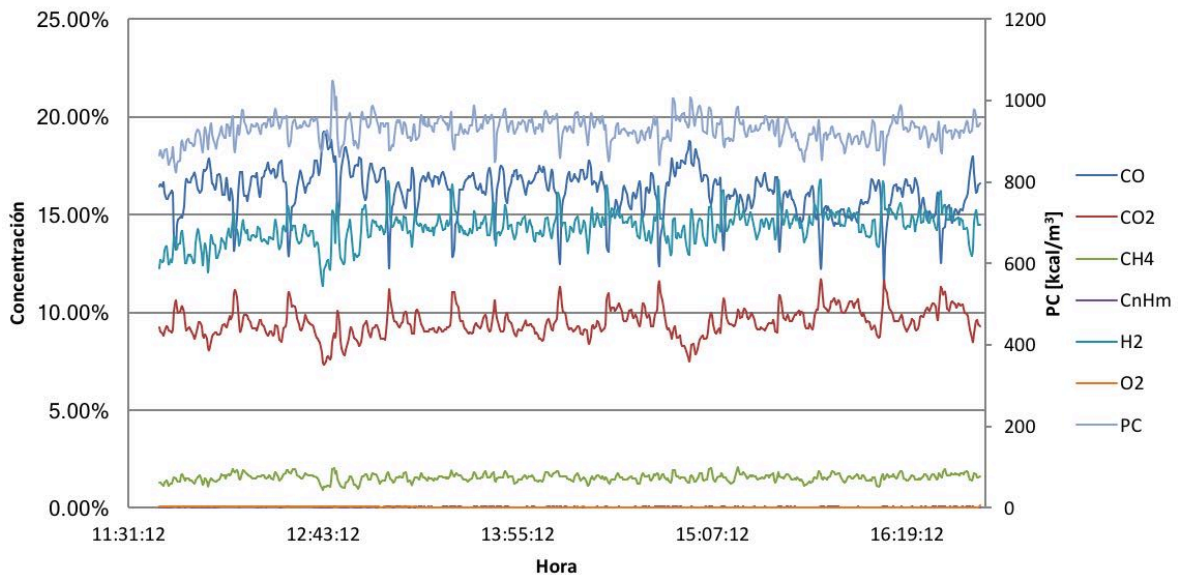


Fotografía 14: Pantalla de muestra de gas de síntesis. Fuente: G2E.

Análisis del Gas de Síntesis COMBO-40

GREEN

Composición y PC vs Tiempo



Gráfica 2: Composición y poder calórico de gas de síntesis de olote de maíz en gasificador Combo-40. Fuente: G2E.

Con base en los flujos energéticos de entrada y salida del equipo, se realizaron las cuantificaciones del potencial energético de cada biomasa y la eficiencia del proceso de transformación (Tabla 3).

Tabla 3: Mediciones de corridas de olote de maíz en gasificador Combo-40. Fuente: G2E.

COMBO-40						
Prueba	Peso [kg]	Flujo [m³]	PC [kcal/m³]	Energía inicial [kcal]	Energía final [kcal]	η% (Ef/Ei)
1	33.10	85.59	869	121,684	74,425	61%
	30.00	85.59	837	110,287	71,718	65%
	25.30	85.59	855	93,009	73,231	79%
	32.20	85.59	847	118,375	72,514	61%
	32.20	85.59	874	118,375	74,823	63%
	25.60	85.59	890	94,112	76,256	81%
2	29.00	85.59	883	106,611	75,619	71%
	28.84	85.59	900	106,023	77,052	73%
	27.36	85.59	921	100,582	78,882	78%
	29.50	85.59	925	108,449	79,201	73%
	25.20	85.59	930	92,641	79,678	86%
	26.14	85.59	928	96,097	79,440	83%
3	32.42	85.59	953	119,184	81,589	68%
	33.48	85.59	924	123,081	79,121	64%
	29.54	85.59	935	108,596	80,076	74%
	30.72	85.59	974	112,934	83,419	74%
	33.70	85.59	988	123,889	84,613	68%
	25.30	85.59	940	93,009	80,474	87%
	27.60	85.59	1,013	101,464	86,763	86%
4	30.80	85.59	887	113,228	75,937	67%
	29.80	85.59	931	109,552	79,758	73%
	28.60	85.59	923	105,140	79,042	75%
	32.40	85.59	917	119,110	78,564	66%
	31.40	85.59	925	115,434	79,201	69%

En el Anexo: “Resultados pruebas olote1.pptx” se pueden ver los resultados de distintos gasificadores.

6.3.3 Viabilidad económica

Los valores obtenidos mediante los balances energéticos nos permiten hacer una comparación energética y financiera contra otras fuentes de energía convencionales (Tabla 4).

Tabla 4: Comparativo económico de resultados de los distintos gasificadores probados con olote de maíz. Fuente: G2E.

Beneficios económicos por año (7000 horas)										
Equipo	Masa [ton]	Energía final [Mcal]	Diesel		Gas LP		Gas Natural		Electricidad	
			m ³	\$	m ³	\$	m ³	\$	kWh	\$
CB-40	207	548,740	65.7	\$905,353	90.1	\$707,334	57,398	\$143,656	191,455	\$158,046
APL PP20	78	301,868	36.2	\$498,045	49.6	\$389,112	31,575	\$79,026	105,321	\$86,943
PG-45	339	1,013,817	121.5	\$1,672,672.15	166.5	\$1,306,824	106,045	\$265,410	353,720	\$291,996

Litros de combustible por kilo de biomasa			
Equipo	Diesel	Gas Natural	Gas LP
CB-40	0.3	277.1	0.4
APL PP20	0.5	402.8	0.6
PG-45	0.4	313.2	0.5

El último análisis realizado es la evaluación financiera de un posible proyecto comercial (Tabla 5) estimando su TIR y el “BESP” (mejor precio estimado de venta, por sus siglas en inglés). El BESP nos dice a qué precio se debería de vender la energía para que los proyectos pudieran ser razonablemente rentables en el mercado mexicano.

Tabla 5: Simulación financiera de distintos escenarios de un proyecto de gasificación de olote de maíz. Fuente: G2E.

Concepto	Real	BESP	Diesel int 10%	GLP int 10%	GN int 10%
Costo planta	\$68,828,191	\$68,828,191	\$16,497,360	\$16,497,360	\$16,497,360
Consumo eléctrico planta kW _e h	174	174	174	174	174
Consumo térmico planta kW _t h	-	-	-	-	-
Horas de operación	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000
Biomasa procesada (kg/h)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mano de obra	\$219,750	\$219,750	\$219,750	\$219,750	\$219,750
Precio inicial (kW _e h)	\$0.87	\$2.40	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Costo inicial biomasa (Ton)	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Precio térmico (kW _t h)	\$0.00	\$0.00	\$1.42	\$1.13	\$0.27
Precio litro gas LPG	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$8.01	\$0.00
Precio MBTU gas natural	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$78.32
Precio litro Diesel	\$0.00	\$0.00	\$13.77	\$0.00	\$0.00
Precio biocarbón (Ton)	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Inflación	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%
Apoyo inversión	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Tasa interes	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%
Tasa VAN	8.0%	8.0%	8.0%	8.0%	8.0%

Resultados	Real	BESP	Diesel int 10%	GLP int 10%	GN int 10%
Año 0	-\$ 7,398,938	-\$ 7,398,938	-\$ 2,324,349	-\$ 2,324,349	-\$ 2,324,349
Año 1	-\$ 12,526,478	-\$ 1,525,796	\$ 13,087,083	\$ 8,604,176	-\$ 4,913,593
Año 20	\$ 36,305	\$ 13,283,211	\$ 18,577,802	\$ 13,205,866	-\$ 2,992,684
Calculo TIR	#¡NUM!	17.74%	565.20%	372.26%	#¡NUM!
Cálculo VAN	-\$ 93,399,145	\$ 28,097,605	\$ 24,926,554	\$ 16,411,568	-\$ 9,264,544

OPEX	\$ 5,095,909	\$ 5,095,909	\$ 4,310,946	\$ 4,310,946	\$ 4,310,946
EBITDA	\$ 1,159,381	\$ 12,160,064	\$ 16,466,773	\$ 11,983,866	-\$ 1,533,902

Los resultados mostrados en las columnas “Diesel int 10%”, “GLP int 10%” y “GN int 10%” representan la rentabilidad de un equipo de gasificación para sustituir Diesel, Gas Licuado y Gas Natural para un proceso térmico (caldera u horno) donde no se tuviera que limpiar gas para removerle alquitranes ya que se quemaría de inmediato. Como se puede observar, los proyectos bajo estas condiciones son muy rentables.

6.4 Divulgación y transferencia de conocimiento

Uno de los principales objetivos del centro demostrativo es la divulgación de la tecnología en diversos sectores, desde estudiantes hasta tomadores de decisión, tanto del ámbito político como del financiero. Congruentes con este fin, durante 2016 se recibieron casi 1,200 visitantes, desde estudiantes de diversos niveles (Fotografía 15) hasta el Rector de la UNAM, Dr. Enrique Graue (Fotografía 16), sub-secretarios de estado (Fotografía 17 y Fotografía 18) y directivos de alto nivel como el entonces Director General de CFE, Enrique Ochoa Reza (Fotografía 19).



Fotografía 15: Visita alumnos cuarto de primaria del Liceo Franco Mexicano. Fuente: G2E.



Fotografía 16: Visita Enrique Graue, Rector UNAM y William Lee, Coordinador de la Investigación Científica, UNAM. Fuente: Gaceta UNAM.



Fotografía 17: Visita César Hernández, Subsecretario Electricidad SENER, Rodolfo Lacy, Subsecretario Planeación SEMARNAT. Fuente: G2E.

Leonardo Beltrán retweeted
Leonardo Beltrán @LeoBeltranR · 40 min
 Felicidades a @G2EMexico y @IIUNAM por su liderazgo en el desarrollo y escalamiento del aprovechamiento de residuos
 Leonardo Beltrán



Fotografía 18: Visita Leonardo Beltrán, Subsecretario de Planeación SENER. Fuente: Twitter @LeoBeltranR



Fotografía 19: Enrique Ochoa, Director General CFE. Fuente: Twitter @EnriqueOchoaR

Como parte de la estrategia de divulgación, se tuvo una importante presencia en medios, tanto de distribución nacional como el periódico El Economista (Fotografía 20, Fotografía 21, Fotografía 22) como en publicaciones de nicho como la Gaceta UNAM.

7 Participación Profesional

Como Director General de G2E, mi participación en el proyecto fue en todas las áreas. En las áreas técnico-operativas me involucré directamente mientras que en las administrativas únicamente llevé la supervisión.

Para el centro demostrativo desarrollé la idea conceptual, apoyado en un análisis de estado de arte de diferentes tecnologías de generación eléctrica que elaboré en el periodo 2013-2014 para el “Ejido El Largo” en Chihuahua. La idea la presenté al entonces Director General de Fibras Naturales y Bioenergéticos de la SAGARPA, Dr. Guillermo del Bosque , quien en su momento fue relevado por el Ing. Jesús Arroyo quien fue sensible a la propuesta, permitiéndome concretar el apoyo financiero del proyecto.

A inicio del 2014, acordé con el Dr. Luis Álvarez Icaza Longoria, entonces investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM, un programa de colaboración para fortalecer el impacto del proyecto. Logramos asegurar el apoyo del entonces director, Dr. Adalberto Noyola, y se inició la construcción dentro de los terrenos asignados a la planta de composta de Ciudad Universitaria. Paralelamente a este proceso, realicé la compra de los equipos y la supervisión de la logística de importación e instalación.

Realicé la conformación del equipo de trabajo incluyendo las disciplinas de mecánica, agronomía, biotecnología, medio ambiente, desarrollo social y comunicaciones.

Desarrollé, junto con mis colegas, los protocolos de pruebas y el modelo matemático para los análisis financieros.

Una parte relevante de mi trabajo fue la divulgación y el cabildeo, buscando que el entorno político y financiero permita el aprovechamiento energético de residuos agroforestales.

8 Resultados y aportaciones

El aprovechamiento energético de las biomásas analizadas es tecnológicamente viable, si bien cada una presenta requerimientos variables de acondicionamiento.

El principal reto es la distorsión del mercado por subsidios en el sector eléctrico. Si el precio de venta de la electricidad reflejara los costos de producción, transporte y distribución, o se consideraran los servicios conexos como no intermitencia, potencia, arranque en negro y otros beneficios como flexibilidad para realizar generación distribuida, definitivamente se detonaría el uso de biomasa como fuente energética en la matriz del país.

Si bien en algunos casos el balance energético puede llegar a ser negativo, como es el caso de los residuos de invernadero, existen beneficios de interés para el productor de los residuos, por ejemplo, la reducción del riesgo sanitario que representan los residuos putrescibles al densificarlos y facilitar y abaratar su transporte hacia sitios de disposición final.

Como consecuencia de este proyecto se están explorando nuevas alternativas tecnológicas, como los motores de combustión externa. Esto nos permite simplificar el proceso de limpieza del gas de síntesis o incluso eliminar el proceso de gasificación si no se pretende producir biocarbón. En caso de producir biocarbón el proceso de pirólisis se puede optimizar al tipo de carbón requerido según el rango de temperatura necesario.

Las siguientes ilustraciones muestran los distintos grados de simplificación alcanzables mediante la utilización de motores de combustión externa, partiendo de la gasificación y la utilización de un motor de combustión interna (Ilustración 7), pasando por la eliminación del proceso de limpieza del gas de síntesis (Ilustración 8) y culminando en la eliminación total de la gasificación (Ilustración 9).

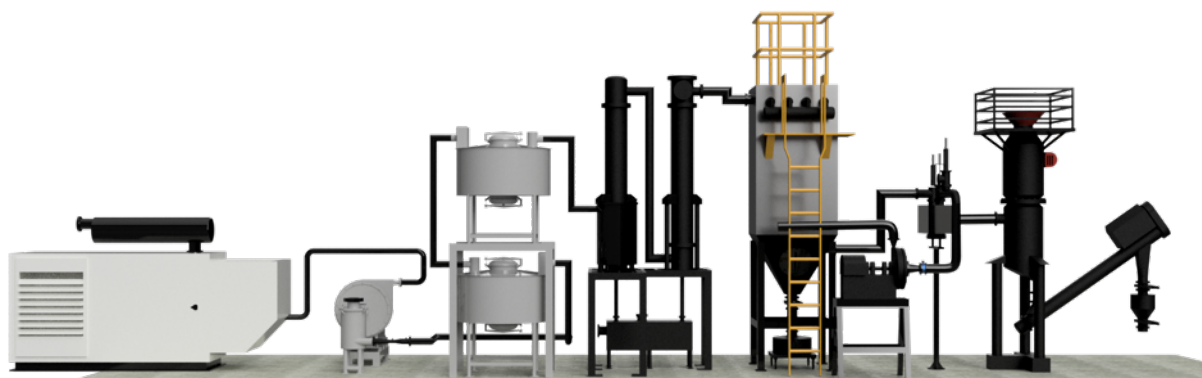


Ilustración 7: Gasificación, limpieza y moto-generador de combustión interna. Fuente: G2E

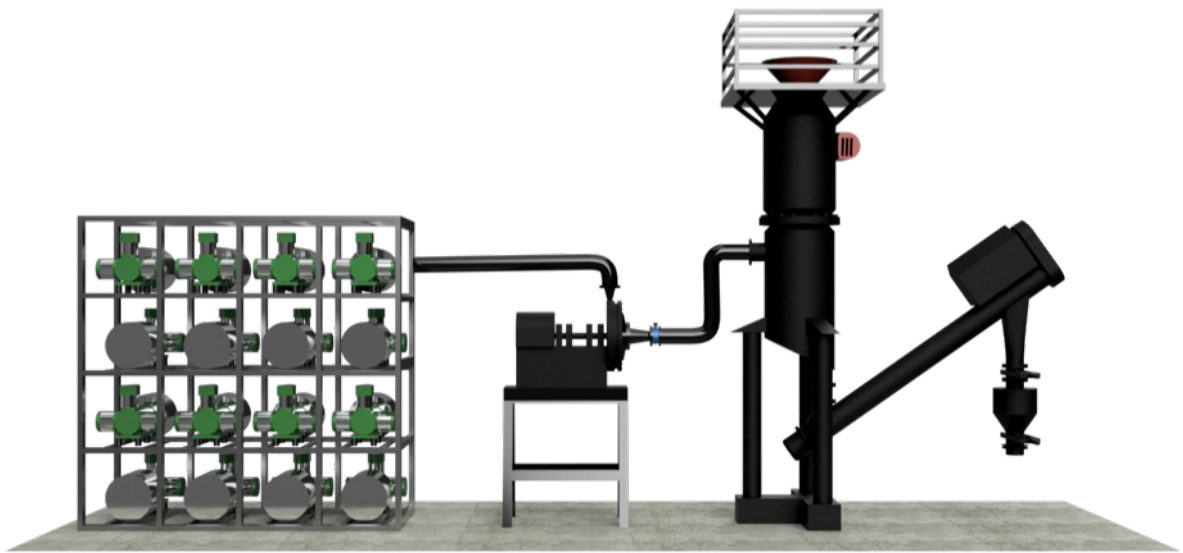


Ilustración 8: Gasificación y moto-generadores de combustión externa. Fuente: G2E

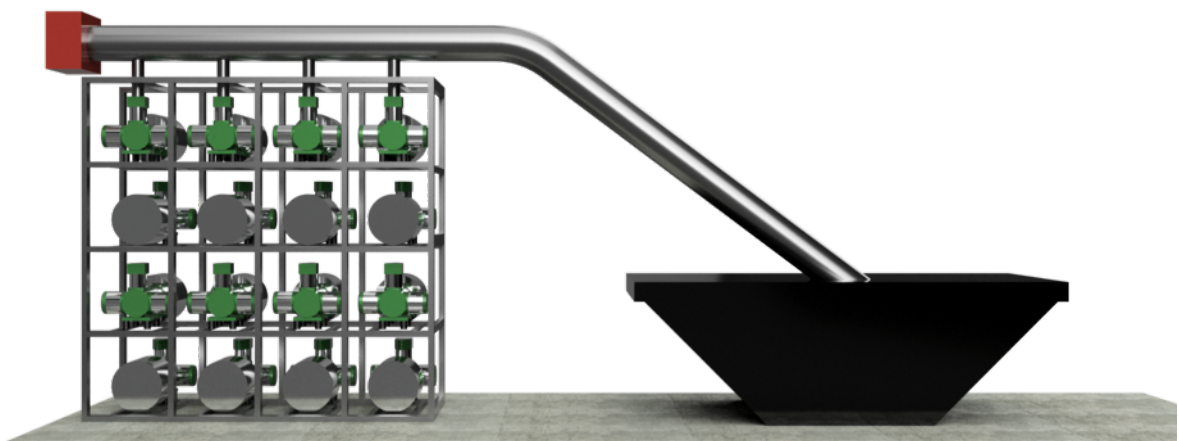


Ilustración 9: Alimentación directa a moto-generadores de combustión externa. Fuente: G2E.

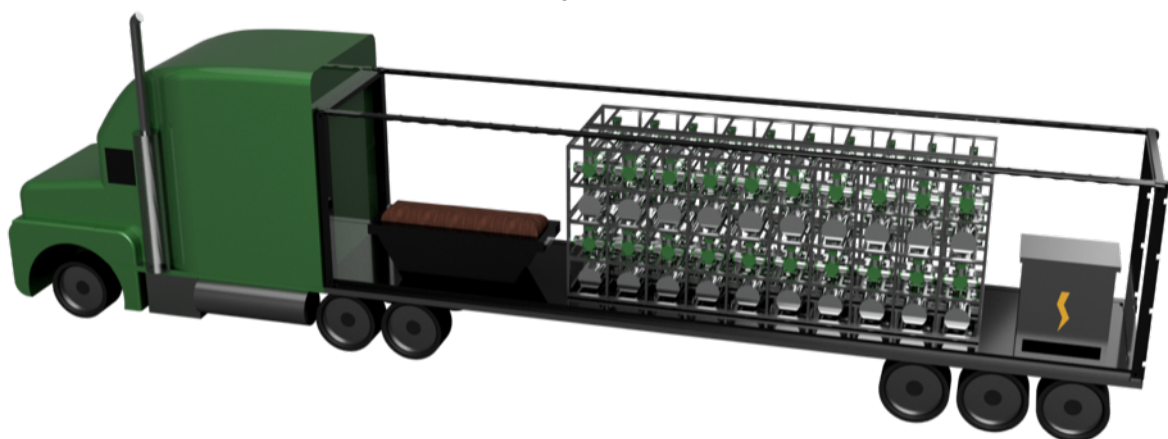


Ilustración 10: Planta móvil de moto-generadores de combustión externa. Fuente: G2E.

9 Conclusión

El aprovechamiento energético de la biomasa no es un problema tecnológico, sino únicamente financiero.

10 Bibliografía

- Ahrenfeldt, J., Thomsen, T. P., Henriksen, U., & Clausen, L. R. (2011). Biomass gasification cogeneration, 1–16. American Carbon Registry. (2010). Methodology for Biochar Projects. Version 1.0.
- Anderson, P. S. (2010). Making biochar in small gasifier cookstoves and heaters. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Andersson, J. (2013). *Techno-Economic Analysis of Integrated Biomass Gasification for Green Chemical Production*.
- Axelsson, L., Franzén, M., Ostwald, M., Berndes, G., Lakshmi, G., & Ravindranath, N. H. (2012). Perspective: Jatropha cultivation in southern India: Assessing farmers' experiences. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3), 246–256. <http://doi.org/10.1002/bbb>
- Base, U. S. I. (2011). Protocolo de Pruebas Normalizado para la Evaluación del Desempeño Micro-Ambiental, Energético y Ambiental de Estufas Mejoradas que Quemam Leña, 1–72.
- Biederman, L. A., & Stanley Harpole, W. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5(2), 202–214. <http://doi.org/10.1111/gcbb.12037>
- Biedermann, F., & Obernberger, I. (2005). Ash-related Problems during Biomass Combustion and Possibilities for a Sustainable Ash Utilisation Friedrich Biedermann. *Proceedings of the Internacional Conference "World Renewable Energy Congress" (WREC)*, (x), 8. Retrieved from www.bios-bioenergy.at
- Biocarbon, A. (2005). Resources: coMPANIEs & oRGANIZATIoNs, 353–361.
- Biomass, T., & Characterization, S. (n.d.). Biomass Surface Characterization Laboratory.
- Blanca, L., & Guízar, V. (2006). Estudio de la Demanda Nacional de Pulpa, Fibra y Agua para la Compactación de la Oferta Regional del Cocotero, 99.
- Blanco, S., & Berrueta, V. (2012). INFORME FINAL Participantes.
- Bochalya, R. K. (n.d.). Analysis of Synthesis Gas Produced From, (109).
- Bradshaw, R. W., & Siegel, N. P. (2009). Molten Nitrate Salt Development For Thermal Energy Storage In Parabolic Trough Solar Power Systems. *Es2008: Proceedings of the 2nd International Conference On Energy Sustainability, Vol 2*, 631–637. <http://doi.org/10.1115/ES2008-54174>
- Brewer, C. E., & Brown, R. C. L. D. a. (2012). Biochar characterization and engineering. *Graduate Theses and Dissertations*, 12284. <http://doi.org/12284>
- Brewer, C. E., & Brown, R. C. L. D. a. (2012). Biochar characterization and engineering. *Graduate Theses and Dissertations*, 12284. <http://doi.org/12284>
- Bruce, N., Perez-Padilla, R., & Albalak, R. (2000). Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge. *Bull. World Health Organ*, 78(9), 1078–1092. <http://doi.org/10.1590/S0042-96862000000900004>
- Bruce, N., Perez-Padilla, R., & Albalak, R. (2002). The health effects of indoor air pollution exposure in developing countries, 40. Retrieved from http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/67496/1/WHO_SDE_OEH_02.05.pdf
- Calvelo Pereira, R., Kaal, J., Camps Arbostain, M., Pardo Lorenzo, R., Aitkenhead, W., Hedley, M., ... Maci??-Agull??, J. A. (2011). Contribution to characterisation of biochar to estimate the labile fraction of carbon. *Organic Geochemistry*, 42(11), 1331–1342. <http://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.09.002>
- Cc, P., Comunicación, Q., & México, N. De. (2012). Proyecto RFQ-11-2012 Escenarios de mitigación de gases efecto Informe Final.
- CIF-CTF. (2013). Mexico Clean Technology Fund Investment Plan revision. Retrieved from https://www.climateinvestmentfunds.org/cif/sites/climateinvestmentfunds.org/files/CTF_TFC.11_PPT3 Mexico CTF IP revision May 2 VP 1may13.pdf
- Conde García, M.; Fernández-Golfín Seco, J.I.; Mier Pérez, R. (2013). Cálculo Del Consumo Calorífico En El Secado De La Madera. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Contacts, E. (2007). Material Safety Datasheet, 62, 1–2.

- Cox, J. (2012). Biochar in horticulture: prospects for the use of biochar in Australian horticulture. *NSW Department of Primary Industries*, 104. Retrieved from http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0008/447857/DPI-BioChar-in-Horticulture.pdf
- Craig, K. R., & Mann, M. K. (1996). Cost and Performance Analysis of Biomass-Based Integrated Gasification Combined-Cycle (BIGCC) Power Systems. *Biomass*, (October), 1–70.
- Csiro. (2010). Biochar for agronomic improvement and greenhouse gas mitigation, 6.
- D, D. W. P. (2004). Definition of a standard biomass. *Contract*, 1–14.
- Design, D. (n.d.). Clean Technologies and Fuels, 1–15.
- Di Marcello M., Gruber R., Rapagna S., (2011). Produzione di gas di sintesi mediante gassificazione in continuo di biomasse (miscanthus) in apparecchiature a letto fluido e a letto fluido circolante (caratterizzazione chimica delle frazioni organiche pesanti) prodotte dal processo di gassificazione. ¿REVISTA...?
- Díaz, R., Becerril, V., & Masera, O. (2011). Estufas de leña. *Red Mexicana de Bioenergía*, 3(Cuadernos Temáticos sobre Bioenergía), 36.
- Drummond, A. R. F., Gazineu, M. H. P., Almeida, L., & Maior, A. S. (2006). Produção E Valor Energético Da Torta De Mamona Do Agreste Pernambucano. *2º Congresso Brasileiro de Mamona*, 1–5.
- EEO Trust. (2010). Making a Difference: Why and how to employ and work effectively with Maori. <http://doi.org/10.4016/19470.01>
- Electricos, P., & Base, C. O. N. (n.d.). INTRODUCCIÓN :
- Elliott, D. C., Biller, P., Ross, A. B., Schmidt, A. J., & Jones, S. B. (2015). Hydrothermal liquefaction of biomass: Developments from batch to continuous process. *Bioresource Technology*, 178, 147–156. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.132>
- En, B., & Suelo, E. L. (n.d.). Alibio/ bpg- plus, (836).
- EPA, PCIA, A. (2013). The Water Boiling Test, 4.2.2, 86.
- Equipment, S. E. (n.d.). 5. Safety Guidelines. *Evaluation*, 41–66.
- Espinoza-López, O. (2012). Aprovechamiento maderable de especies tropicales en las selvas alta del Estado de Campeche, México, 67.
- Estate, S. (2008). Electricity Generation from Biomass. *October*, 27(October).
- Ezzati, M., & Kammen, D. M. (2001). Quantifying the effects of exposure to indoor air pollution from biomass combustion on acute respiratory infections in developing countries. *Environmental Health Perspectives*, 109(5), 481–488. <http://doi.org/10.2307/3454706>
- FAO. (2010). Criteria and indicators for sustainable woodfuels. *FAO Forestry Paper*, 160, 1–103.
- FAO. (2010). What woodfuels can do to mitigate climate change. *Forestry Department*, 98.
- FAO. (2013). Wood Fuels Handbook. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Fee, A. C. R., & Published, S. (2013). ACR Fee Schedule 1 – Published January 2013, (January), 2013.
- Fire, O., & Kiln, C. (n.d.). Kon--Tiki.
- Flannery, T. (n.d.). and Agricultural.
- Free, H. F., McGill, C. R., Rowarth, J. S., & Hedley, M. J. (2010). The effect of biochars on maize (*Zea mays*) germination. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 53(1), 1–4. <http://doi.org/10.1080/00288231003606039rPii920608310>
- Frogner, K. J., & Taylor, P. (2010). Climate change mitigation using thinly distributed feedstock. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Gasificaci, L. (2014). La Gasificación de Biomasa y los Sistemas de Cogeneración.
- Gasificaci, L. (2014). La Gasificación de Biomasa y los Sistemas de Cogeneración (Conclusión).
- Gasificaci, L. (2014). La Gasificación de Biomasa y los Sistemas de Cogeneración (Continuación).
- Glynn, T. (2008). Effective practice for psychologists in education, (110), 22–29.
- Graywater, E., Wilson, A., Macarthur, D., & Brien, K. O. (1995). Contributing Editors. *Building*, 4(2), 1–20.
- Hale, S. E., Jensen, J., Jakob, L., Oleszczuk, P., Hartnik, T., Henriksen, T., ... Cornelissen, G. (2013). Short-term effect of the soil amendments activated carbon, biochar, and ferric oxyhydroxide on bacteria and invertebrates. *Environmental Science and Technology*, 47(15), 8674–8683. <http://doi.org/10.1021/es400917g>
- Hammond, J., Shackley, S., Sohi, S., & Brownsort, P. (2011). Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK. *Energy Policy*, 39(5), 2646–2655. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.033>
- Harmsworth, G. (2005). Good practice guidelines for working with tangata whenua and Māori organisations : Consolidating our learning.
- Hartt, C. (1966). #Mbdl Tpj m Hsffo Sjdf, 4, 1870.
- Hirst, P. (2010). Biochar production: from colliers to retorts. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Hirst, P. (2010). From blacksmith to biochar: The essence of community. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.

- Humberto, R. (2003). Cadena Agroalimentaria E Industrial De Arroz. *Unifap*. Retrieved from <http://www.cofupro.org.mx/cofupro/Publicacion/Archivos/penit5.pdf>
- Ibarrola, R., Shackley, S., & Hammond, J. (2012). Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: A life cycle carbon assessment. *Waste Management*, 32(5), 859–868. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.005>
- Initiative, I. B. (n.d.). Para Los Pueblos , La Tierra Y Los Ecosistemas.
- Interconexion, C. D. E., Fuente, P., Renovable, D. E. E., Celebran, Q. U. E., Una, P. O. R., Lo, E. N., ... Denominara, S. E. (2007). DIARIO OFICIAL Lunes 30 de enero de 2006 Lunes 9 de julio de 2007, (d).
- Interconexion, C. D. E., Fuente, P., Renovable, D. E. E., Cogeneracion, O. S. D. E., Escala, M., Celebran, Q. U. E., ... El, D. (2010). (Primera Sección) DIARIO OFICIAL Jueves 8 de abril de 2010.
- Interconexion, C. D. E., Fuente, P., Renovable, D. E. E., Cogeneracion, O. S. D. E., Escala, M., Celebran, Q. U. E., ... El, D. (2010). (Primera Sección) DIARIO OFICIAL Jueves 8 de abril de 2010.
- Interconexion, C. D. E., Fuente, P., Renovable, D. E. E., Cogeneracion, O. S. D. E., Escala, M., Celebran, Q. U. E., ... El, D. (2010). (Primera Sección) DIARIO OFICIAL Jueves 8 de abril de 2010.
- International Organization for Standardization. (2012). IWA 11: 2012 Guidelines for evaluating cookstove performance, (February 2012). Retrieved from <http://www.pciaonline.org/files/ISO-IWA-Cookstoves.pdf>
- Iowa State University. (2013). Proposed Safety Tiers for Cookstoves.
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144(1), 175–187. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Joseph, S., & Major, J. (2010). Making and using biochar mixed with organic matter, minerals, and wood vinegar. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Joyce, J. (2010). Conditioning biochars for application to soils. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Joyce, J. (2010). Medium & large scale production. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Kalyani, P., & Anitha, A. (2013). Biomass carbon & its prospects in electrochemical energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(10), 4034–4045. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.048>
- Kant, I., & Ibid, I. (n.d.). La Mera Forma, 97210.
- Krull, E. (2012). Biochar. *Csiro*, (x), 357–384. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00524-2>
- Kuppusamy, S., Krishnan, P. S., Kumutha, K., French, J., Carlos, G. E., & Toefield, B. (2011). Suitability of UK and Indian Source Acacia Wood Based Biochar as a Best Carrier Material for the Preparation of Azospirillum Inoculum. *International Journal of Biotechnology*, 4(6), 582–588. Retrieved from <http://ijbiotch.webs.com/ijb462011.htm\npapers2://publication/uuid/F4BD25D3-E723-4DEE-89FF-D0A20D9E5878>
- Laird, D. A. (2008). The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, 100(1), 178–181. <http://doi.org/10.2134/agronj2007.0161>
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Levine, J., & Mulqueen, D. (2010). Automated biochar production. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Lunds University. (2003). Toxicity of wastewater generated from gasification of woodchips Toxicity of wastewater generated from gasification of woodchips. *Organization*, (51166).
- MacCarty, N., Ogle, D., & Still, D. (2007). Laboratory comparison of the global-warming potential of six categories of biomass cooking stoves. *Creswell, OR: ...*, (September), 2007. Retrieved from http://farm-check.com/lcs/docs/Global_warming_full_9-6-07.pdf
- Mahadevan, R., Adhikari, S., & Shakya, R. (2011). Fast Pyrolysis of Biomass Blends using a Fluidized Bed Reactor, 68005.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 333(1), 117–128. <http://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0>
- Major, J., & Wilson, K. (2010). Gauging the Impact of Biochar : Simple Tests for Farmers and Gardeners. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*.
- McLaughlin, H. (2010). Characterizing biochars: attributes, indicators, and at-home tests. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- McLaughlin, H. (2010). How biochar helps the soil. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- McLaughlin, H. (2010). What is biochar. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.

- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). No Title No Title. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015, 1*. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). No Title No Title. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015, 1*, 7–9. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). No Title No Title. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015, 1*, 91. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mishra, V. (2003). Indoor air pollution from biomass combustion and acute respiratory illness in preschool age children in Zimbabwe. *International Journal of Epidemiology*, *32*(5), 847–853. <http://doi.org/10.1093/ije/dyg240>
- Mohanty, S. K., & Boehm, A. B. (2014). Escherichia coli removal in biochar-augmented biofilter: Effect of infiltration rate, initial bacterial concentration, biochar particle size, and presence of compost. *Environmental Science and Technology*, *48*(19), 11535–11542. <http://doi.org/10.1021/es5033162>
- Moxham, G. (2009). Geoff Moxham, (August), 2009–2009.
- Novak, J. M., Busscher, W. J., Laird, D. L., Ahmedna, M., Watts, D. W., & Niandou, M. a. S. (2009). Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. *Soil Science*, *174*(2), 105–112. <http://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181981d9a>
- NREL. (2014). Biomass Compositional Analysis Laboratory Providing detailed and accurate characterization. *National Renewable Energy Laboratory, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*.
- Odhner, P. B., Horvath, I. S., Kabir, M. M., & Schabbauer, A. (2012). Biogas From Lignocellulosic Biomass. *Avfall Sverige*, 1–55. Retrieved from <http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Rapporter/U2012-07.pdf>
- Oficial, D. (2012). 3371 Contrato de interconexión para fuente colectiva de energía renovable o sistema colectivo de cogeneración eficiente en pequeña escala, 12.
- Orc, E., & Cycle, O. R. (2014). El ORC (Organic Rankine Cycle).
- Paper, F. A. O. F. (n.d.). FORESTRY MANAGEMENT A review.
- Pieratti, E. (2011). Biomass gasification in small scale plants : experimental and modelling analysis.
- Prehn, M., & Cumana, I. (2010). La Bioenergía en México: Estudios de Caso #1. Retrieved from <http://www.rembio.org.mx/2011/Documentos/Cuadernos/CT1.pdf>
- Quirk, R. (2010). The accidental scientist: lessons in farming, biochar and collaboration. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Quirk, R., & Taylor, P. (2010). Producing biochar on sugar cane farms: industry benefits, local and global implications. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- R, R. V. I. (n.d.). Construcción de una planta de producción de biochar a partir de purines, 1–52.
- REMBIO. (2011). LA BIOENERGÍA EN MÉXICO Situación actual y perspectiva de Bioenergía, 44.
- Renovables, L. O. S. R. (n.d.). B e r k e s.
- Report, T. H. E., The, O. F., Nations, U., & Sustainability, O. N. G. (n.d.). RESILIENT PEOPLE RESILIENT PLANET A F ut ure Wo rth C h o o s i n g.
- Revolution, T. H. E. B. (n.d.). absorb. “To soak up or drink in,” like a sponge. Used when one substance takes into its volume another substance or radiation (ex. absorbs light). Compare to the more specialized word adsorb.
- Acacia. A genus of shrubs and trees belonging to the subfamily. *Compare A Journal Of Comparative Education*, 338–345.
- Richert, A., Gensch, R., Jönsson, H., Stenström, T.-A., & Dagerskog, L. (2011). *Guía Práctica de Uso de la Orina en la Producción Agrícola*.
- Riegelhaupt, E., Cecotti, L., & Gutiérrez, J. P. (2012). *Inventory of research, development and transfer of technologies for bioenergy*.
- Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010). Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science and Technology*, *44*(2), 827–833. <http://doi.org/10.1021/es902266r>
- Romano, D. D. S., & Calimá, A. P. O. (n.d.). Gas Pobre.
- Rose, B. (2010). Large scale pyrolysis for dry land agriculture. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Roth, C. (2013). Micro-gasification :
- Ruiz-Mercado, I., Maser, O., Zamora, H., & Smith, K. R. (2011). Adoption and sustained use of improved cookstoves. *Energy Policy*, *39*(12), 7557–7566. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.028>
- Sanderson, J. (n.d.). Biomass Gasification : Recent Activities in Australia.
- Schulz, H., & Glaser, B. (2012). Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *175*(3), 410–422. <http://doi.org/10.1002/jpln.201100143>
- SENER. (2013). Informe sobre la participación de las energías renovables en la generación de electricidad en México al 31 de diciembre de 2012. Retrieved from http://sener.gob.mx/res/2024/Doc_Prensa/Informe_participacion_energias_renovables.pdf
- SENER. (2012). Iniciativa Para El Desarrollo De Las Energías Renovables En México, 35.

- Sengling, R., Mônica, A., Barbosa, Q., Chambi, H., & Abdala, C. (n.d.). Castor bean cake as raw material for biodegradable material.
- Shackley, S., Hammond, J., Gaunt, J., & Ibarrola, R. (2011). The feasibility and costs of biochar deployment in the UK. *Carbon Management*, 2(3), 335–356. <http://doi.org/10.4155/cmt.11.22>
- Siepen, K. (2010). Making a difference with biochar: from the ground up. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Sohi, S. (2009). Climate Change and Soil: A Review to Guide Future Research, (February).
- Sparkes, J., & Stoutjesdijk, P. (2011). *Biochar: implications for agricultural productivity. Production. Canberra, Australia*. Retrieved from http://adl.brs.gov.au/data/warehouse/biochar9abcm001/biochar9abcm00101/TR.2011.06_Biochar_v1.0.0.pdf
- Sparrevik, M., Lindhjem, H., Andria, V., Fet, A. M., & Cornelissen, G. (2014). Environmental and socioeconomic impacts of utilizing waste for biochar in rural areas in indonesia - A systems perspective. *Environmental Science and Technology*, 48(9), 4664–4671. <http://doi.org/10.1021/es405190q>
- States, U. (2012). Test Results of Cook Stove Performance Today ' s Speakers, 1(866), 1–52.
- Steiner, C., & Taylor, P. (2010). The greener revolution. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Swanson, R. M., Satrio, J. a, Brown, R. C., Platon, A., & Hsu, D. D. (2010). Techno-Economic Analysis of Biofuels Production Based on Gasification, (November), 165. <http://doi.org/10.2172/994017>
- Taylor, E. a. (1996). Preface to Proceedings. *Asian American and Pacific Islander Journal of Health*, 4(1-3), 14. Retrieved from <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2895866&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
- Taylor, P. (2010). “Biochar Ancient Origins, Modern Inspirations.” *Cornell Hospitality Quarterly*, 51(3), 301–303. <http://doi.org/10.1177/1938965510372901>
- Taylor, P., & Mason, J. (2010). Biochar production fundamentals. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Tema, T. T. (2004). Termodinámica y Termotecnia Tablas Tema 3: Combustibles, 432–436. Retrieved from <http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). No Title No Title. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). No Title No Title. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). No Title No Title. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- U.S Department of Energy, O. O. S. (2009). Climate Change Research Program : Strategic Plan, 23.
- Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T. W., & Rillig, M. C. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil - Concepts and mechanisms. *Plant and Soil*, 300(1-2), 9–20. <http://doi.org/10.1007/s11104-007-9391-5>
- Weaver, M. (2010). The pyrolysis of biomass to give us biochar and using it as a soil improver. *IEA Bioenergy Workshop 13, ExCo66: Thermal Pre-Treatment of Biomass for Large-Scale Applications*.
- Wells, B. (2010). On the farm: A biochar biography. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment*, 361.
- Who. (2005). Workshop Resources Indoor Air Pollution and Household Energy Monitoring. *World Health Organization*, 20.
- Wilson, K. (2014). How Biochar Works in Soil. *The Biochar Journal*, 1–24. <http://doi.org/10.1021/jf205278v>
- Woolf, D., Lehmann, J., Fisher, E. M., & Angenent, L. T. (2014). Biofuels from pyrolysis in perspective: Trade-offs between energy yields and soil-carbon additions. *Environmental Science and Technology*, 48(11), 6492–6499. <http://doi.org/10.1021/es500474q>
- Yakaboylu, O., Harinck, J., Smit, K. G., & De Jong, W. (2015). Supercritical water gasification of biomass: A literature and technology overview. *Energies*, 8(2), 859–894. <http://doi.org/10.3390/en8020859>
- Zapata, N., Vargas, M., Reyes, J. F., & Belmar, G. (2012). Quality of biodiesel and press cake obtained from *Euphorbia lathyris*, *Brassica napus* and *Ricinus communis*. *Industrial Crops and Products*, 38(1), 1–5. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.004>
- Zhang, J., & You, C. (2013). Water holding capacity and absorption properties of wood chars. *Energy and Fuels*, 27(5), 2643–2648. <http://doi.org/10.1021/ef4000769>
- *Cuando se especifique 0,26%. (n.d.), 36.
- A1 DO NOT SCALE DRAWING IF IN DOUBT ASK add here the initials of your region or country instead of Eire. (n.d.), 12.
- Biochar our unfair advantage. (2012), 2012.
- Biochar_Meta-analysis_Database. (n.d.).
- Biochar_Meta-analysis_Database. (n.d.).

BioEnergy Testing and Analysis Laboratory Biomass Feedstock Analysis Biodiesel Trans-esterification Experiments Engine Dynamometer Testing Fluidized Bed Gasification / Pyrolysis Tests Fluidized Bed Demonstration (Trailer Mounted System). (2010).

Biomass Higuierilla Resultados de Laboratorio UANL15.pdf. (n.d.).

Biomass Higuierilla Resultados ICAMEX. (n.d.).

Cooking with gas from biomass. (n.d.). *Micro*.

Development of technology for treatment of wastewater generated in biomass gasifier systems [Sponsor : Ministry of New and Renewable Energy]. (n.d.).

Energy in Sweden 2012. (2012).

Estufas WBT data calculation sheet 4. (n.d.).

General remarks. (2015), (January).

Geothermal Heat Pumps in New Zealand Introductory Technical Guide EECA and GNS Science (2013)

Geothermal Heat Pumps in New Zealand : Introductory Technical Guide . (n.d.).

GIRA FINAL nov12. (n.d.).

How Carbon Finance and Modern Manufacturing Can Help Accelerate the Diffusion of Lower Cost Higher Quality Cookstoves We usually begin with a Pilot Program. (2011).

Interest grows in biochar ' s potential. (2009), (211), 34–35.

Kinds of Steel.pdf. (n.d.).

Kon--Tiki. (n.d.).

MSDS Lump Charcoal 2.pdf. (n.d.).

MSDS Olive.pdf. (n.d.).

MSDS Wood Pellet.pdf. (n.d.).

11 Glosario

kW_e: kilo Watts eléctricos.

MW_e: Mega Watts eléctricos

12 Anexos

Anexo I: Resultados de pruebas de olote. Archivo: Resultados Pruebas Olote1.pptx

Anexo II: Modelo de análisis financiero. Archivo: Base de Datos financiero.xlsx